

CANDU爐의 改良核燃料週期

CANDU爐는 다양한 개량핵연료주기를 응용할 수 있는 이 점을 가지고 있다. 특히, CANDU爐는 輕水爐와 CANDU爐를 결합시킨 프로그램을 개발함으로써 輕水爐의 사용후핵연료에서 회수한 우라늄과 플루토늄을 효율적으로 재순환시킬 수 있다. 다음은 캐나다原子力公社가 Nuclear Engineering Int'l誌 12月號에 발표한 내용이다.

CANDU爐는 천연우라늄 핵연료를 사용할 수 있을 정도로 중성자경제가 우수하므로 회수우라늄(RU), 저농축우라늄(SEU, U²³⁵ 1.5% 이하), 경수로의 사용후핵연료에서 회수한 우라늄과 플루토늄 및 토륨주기 등 다양한 핵연료주기에 잘 적응시킬 수가 있다. 온라인 핵연료 재장전은 다른 핵연료를 수용함에 있어 핵연료관리에 융통성을 제공한다.

캐나다와 같이 다양한 에너지자원을 풍부하게 갖고 있는 나라에서는 개량핵연료를 도입할 때 경제성을 일차적으로 고려한다. RU와 SEU는 경제성을 즉각 알 수 있는 이점을 갖고 있다.

한편 에너지공급의 안정 확보 또는 재처리시설의 보유 유무 등과 같이 전략적인 고려를 하여야 하는 나라에서는 TANDEM과 같은 핵연료주기에 더 매력을 느낄 것이다. 토륨핵연료주기는 천연우라늄 자원은 빈약하나 토륨매장량은 풍부한 나라의 경우 외에는 일반적으로 장기간을 요하는 사업이다.

캐나다원자력공사(AECL)는 기존 또는 신형 CANDU爐에 개량핵연료주기를 응용할때 적합하도록 CANFLEX개량변들을 개발하고 있다. 이 새로운 43엘리먼트변들은 37엘리먼트변들과 비교하여 피크레이팅이 20% 감소되기 때문에 연소기간 연장에 기여하게 될 것이다. 또한 낮은 레이팅으로 인해 핵연료와 피복재의 피크온도가 낮아질 뿐만 아니라 핵분열가스의 방출이 적어지기 때문에 안전성과 운전여유도가 향상된다.

低濃縮우라늄(SEU)

CANDU爐에 저농축우라늄(SEU)을 사용할 경우 상당한 이득을 볼 수가 있다. 따라서 CANDU爐에 사용될 최초의 개량핵연료는 SEU가 될 것이다. 약 1.2%의 농축도가 핵연료비용은 최소로 하면서 그 이용도(우라늄으로부터 추출되는 에너지의 양)는 최대가 되게 한다.

1.2% 저농축 핵연료의 연소도는 약 22

MWd / kgU로서 천연우라늄을 사용하고 있는 기존 CANDU爐 핵연료에서 달성되고 있는 연소도의 3배가 된다. 따라서 처리하여야 할 사용 후핵연료의 양을 1/3로 감소시킬 수 있음은 폐기물관리문제에 대한 우려를 해소시키는데 상당히 큰 몫을 기여할 수 있다.

천연우라늄을 사용할 경우와 비교하여 핵연료 주기비용의 절감은 0.9%의 농축도에서 20~25% 절감되고, 1.2%의 농축도에서는 25~35% 절감으로 증가한다. 즉, 15GWe 시설용량의 CANDU시스템에서 1.2%의 저농축핵연료 사용으로 절약되는 비용은 연간 1억카나다달러 이상 이 된다.

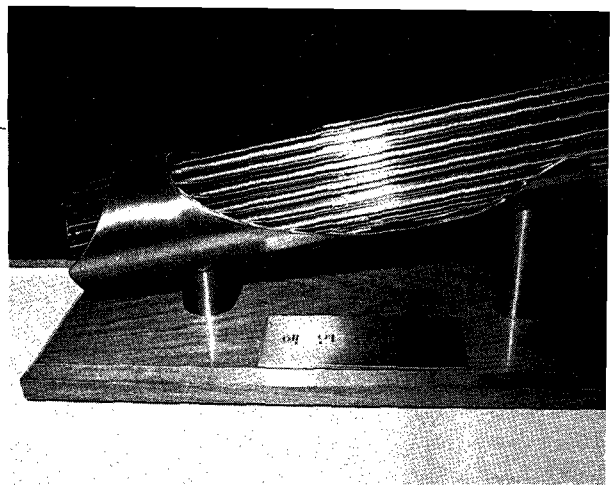
SEU는 현재의 가격수준에서 분명히 경제성이 있으며, 또한 농축시설용량이 과잉상태에 있어 농축가격이 더 떨어질 것으로 예상되고, 레이저를 이용한 AVLIS농축법과 같은 비용이 적게 드는 농축기술의 도입 등으로 인해서 장래에는 그 경제성이 더욱 높아질 것으로 전망된다.

1.2% 저농축핵연료의 우라늄 이용성은 천연우라늄 핵연료와 비교하여 약 30% 향상된다. 경수로의 연소도 향상 등과 같은 경제성 경쟁에서 SEU의 활용은 CANDU爐가 우라늄의 이용성에 대해 그 우위성을 계속 유지할 수 있도록 해준다.

회수우라늄(RU)

회수우라늄(RU)은 SEU핵연료주기의 한 분류이다. 현행 경수로로 부터의 회수우라늄은 CANDU爐와 경수로 모두에서 사용할 수 있으나, 경제성 및 자원 면에서 볼때 CANDU爐에서 사용하는 것이 더 적합하다.

경수로에서 RU를 사용하려면 재농축을 하여야 하는데, 기체확산법 농축공장에서는 오염될 가능성이 있기 때문에 농축작업을 할 수 없으며, 원심분리법 농축공장에서는 캐스케이드 일부를 이용도로 지정하면 농축에 큰 문제가 없다. 그러나 중성자를 흡수하는 성질을 갖고 있는 동위원소인



U^{236} 이 존재하므로 이를 보상하기 위해 U^{235} 의 농축도를 더 높일 필요가 있다. 즉, 1%의 U^{236} 에 대해 U^{235} 를 0.3% 추가로 더 농축시켜야 한다.

또한 RU에는 U^{232} 의 방사성붕괴생성물(주로 Tl^{208})이 함유되어 있기 때문에 농축과 성형가공 공장에 별도의 차폐시설을 설치하여야 하므로 이 또한 경제적 부담이 된다.

농축과정에서 U^{232} 의 농도가 약 4팩터 정도 증가하게 되어 그 이후 단계에서는 핵연료의 방사능 활성도가 높아지게 된다. 또 U^{234} 의 준위가 증가하고 알파선 방출체인 초우라늄원소가 약간 존재하므로 특별한 격납조치가 요구되는데, 이 모든 요인이 추가로 경제적 부담을 초래한다.

경수로에서 RU를 照射시킨후 다시 꺼낸 핵연료는 재순환시키기 전의 최초 경수로 사용후핵연료 보다 높은 우라늄 농축도를 갖는다. 따라서 또 다시 재순환시키는데 대해 관심을 갖게 된다. 그러나 또다시 재순환시킬 경우 U^{232} 와 U^{236} 의 농도가 높아져 별 매력 없다.

CANDU爐에 RU를 활용할때 얻는 이점은 주로 재농축할 필요가 없다는 사실에서 유래한다. 0.9%의 U^{235} 농축 RU는 CANDU爐에서 최소한 13MWd / kgU의 연소도가 되며, 연소후 다시 꺼냈을때 이 핵연료의 U^{235} 농축도는 테일 정도의 수준이라서 더이상 재순환시키는데 대해 매력이 없어진다.

CANDU爐는 소프트스펙트럼이기 때문에 U^{236} 의 중성자효과는 경수로에서 보다 상당히 낮다. RU에서 추출할 수 있는 에너지는 CANDU爐에서 재순환시키는 것이 경수로 보다 2배 이상이 된다. PWR 과 CANDU爐 혼합계통에서 RU를

CANDU爐에서 재순환시킬 경우 우라늄의 이용도는 PWR의 once-through 핵연료주기로 이용할때 보다 26% 높아진다.

재농축시킨 RU핵연료와 비교하여 RU핵연료의 방사능 준위는 낮기 때문에 용이하게 핵연료를 성형가공할 수 있는데, 초기평가에서도 방사능 준위가 CANDU핵연료 성형가공에 수용할 수 있을 정도라고 나타났다. 또한 농축을 할 필요가 없기 때문에 CANDU爐에 다시 재순환시키는 것도 가능하다.

U^{236} 으로 인해 발생하는 CANDU爐에서의 연소도 패널티 때문에 CANDU爐를 운영하고 있는 전력회사들은 천연우라늄이나 SEU와 비교하여 단지 가격면에서 유리하다면 그들 원자로에 사용하기 위해서 RU를 구입할 것이다. CANDU爐와 경수로 두 종류를 함께 운영하고 있는 전력회사들은 농축비용을 절약하면서 RU로 부터 추가의 에너지를 획득할 수 있기 때문에 CANDU爐에 RU를 활용하는 것이 매우 매력적일 것이다. 따라서 RU를 소유하고 있는 경수로 전력회사들은 이를 위해 CANDU爐 설치를 고려하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

탄뎀核燃料週期

TANDEM핵연료주기에서는 경수로 사용후핵연료에서 회수한 우라늄과 플루토늄을 CANDU爐에서 재순환시킨다. 1.5%의 핵분열성 물질을 함유하고 있는 이 원료는 CANDU爐에서 약 25MWd/kg의 연소도를 갖는다. 이 우라늄/플루토늄은 낮은 연소도를 위해 천연우라늄 또는 열화우라늄으로 희석될 수가 있다. 이 핵연료주기의 이점은 우라늄과 플루토늄을 분리시킬 필요가 없다는 것이다.

이 디콘데미네이션프로세스로 인해 이러한 목적으로 새로 설계된 플랜트에서는 비용을 절감시킬 수가 있다. 그러나 플루토늄 분리용으로 설계된 기존 플랜트에서는 디콘데미네이션프로세스로

인한 비용절감 이득이 없을 수도 있다. 따라서 개량핵연료주기에 대한 현행 AECL프로그램에는 이와 같은 경제성이 있는지 여부를 결정하기 위한 것도 포함되어 있다.

사용후핵연료에 함유되어 있는 우라늄과 플루토늄의 재순환은 우라늄자원의 이용성을 향상시킨다. TANDEM 핵연료주기는 PWR의 once-through핵연료주기와 비교하여 40%까지 우라늄 소요량을 저감시킬 수 있다.

토륨核燃料週期

토륨핵연료주기는 열중성자爐이면서도 증식로에 가깝게 소모된 만큼 핵분열성 물질을 생성하는 잠재력을 가진 CANDU爐에서 특별히 유리하다. 토륨은 자연발생적인 핵분열성 동위원소를 갖고 있지 않기 때문에 토륨핵연료주기를 시작하기 위해서는 U^{235} 나 플루토늄이 필요하다.

재래의 토륨핵연료주기에서는 산화토륨에 플루토늄이나 저농축 우라늄(20%의 U^{235})을 혼합하였다. 이 재래의 토륨핵연료주기는 막대한 양의 토륨을 갖고 있는 캐나다에서조차 우라늄가격이 상당히 오르기 전까지는 경제성이 없을 것이다.

단기간에 경제성을 갖을 수 있는 토륨핵연료주기의 한 유형은 once-through토륨핵연료주기이다. 이 주기에서는 토륨과 농축우라늄 핵연료가 각각 분리된 채널에서 照射되고 각각 다른 비율로 연료가 공급된다. 토륨변들에서 생성된 U^{233} 은 in-situ 照射된다. 사용후 토륨핵연료에 함유된 U^{233} 은 즉시 회수될 수도 있고, 또는 얼마간 시간이 지난후 회수될 수도 있으며, 경제성이나 전략적인 측면에 따라서는 폐기될 수도 있다.

토륨핵연료주기가 경제성을 갖고 확립되려면 아직도 상당한 연구가 진척되어야 한다. 그러나 토륨핵연료주기는 우라늄 소요량의 극적인 감소를 가져오기 때문에 장기적으로는 CANDU爐개념의 경쟁력 확보하라는 측면에서 대단히 중요하다.